



(71) Anmelder:

EOS GmbH Electro Optical Systems, 82152 Planegg,
DE

(74) Vertreter:

Prüfer und Kollegen, 81545 München

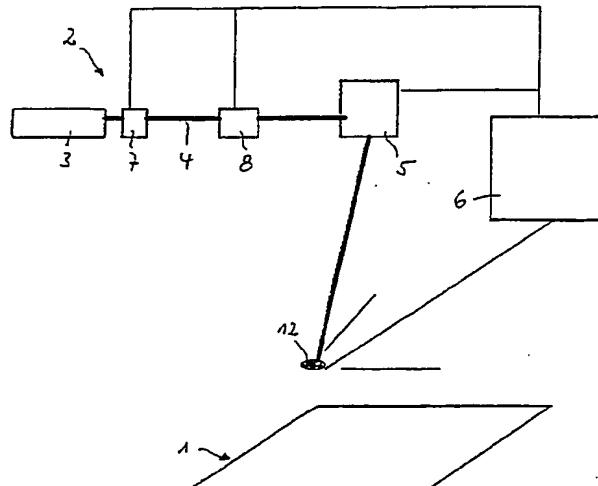
(72) Erfinder:

Serbin, Jürgen, 82166 Gräfelfing, DE; Reichle,
Johannes, 81375 München, DE; Langer, Hans J., Dr.,
82166 Gräfelfing, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

(54) Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen eines dreidimensionalen Objekts

(57) Bei der Herstellung eines Objekts durch aufeinanderfolgendes Verfestigen von Materialschichten 1 an den jeweiligen dem Objekt entsprechenden Stellen tritt das Problem auf, daß die Herstellungsgeschwindigkeit beschränkt ist, da bei einer für die genaue Auflösung benötigten Bündelung des zur Verfestigung verwendeten Lichtstrahls 4 die Scan-Geschwindigkeit, mit der der Lichtstrahl über die Materialschichten 1 geführt wird, nicht beliebig erhöht werden kann. Dieses Problem wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß im Lichtstrahl 4 eine variable Fokuseinheit 8 vorgesehen ist, mittels der die Bündelung des Lichtstrahls 4 bei der Verfestigung einer Schicht 1 verändert wird; damit kann in verschiedenen Bereichen der Schicht 1 mit unterschiedlicher Fokussierung und Scan-Geschwindigkeit gearbeitet werden.



Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Herstellen eines dreidimensionalen Objekts nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 bzw. ein Verfahren nach dem Oberbegriff des Anspruchs 17.

Eine derartige Vorrichtung bzw. ein derartiges Verfahren ist unter dem Begriff "Stereographie" bekannt und kann, wie beispielsweise in der EP-A-0 171 069 beschrieben, durch schichtweises Verfestigen eines flüssigen, photopolymerisierbaren Materials mittels eines gebündelten Laserstrahls erfolgen. Ebenso kann dieses Verfahren auch durch Sinterung von Pulver mittels des Laserstrahls durchgeführt werden (siehe EP-A-0 287 657). In allen Fällen tritt das Problem auf, daß die Herstellungsgeschwindigkeit nicht beliebig erhöht werden kann, da bei vorgebener Bündelung des Laserstrahls eine vom Typ des Lasers und des zu verfestigenden Materials abhängige Scan-Geschwindigkeit des Laserstrahls nicht überschritten werden kann. Auch kann eine eventuelle Dejustierung des Laserstrahls nicht festgestellt werden.

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, die Geschwindigkeit und Genauigkeit bei der Herstellung des Objekts zu verbessern. Ferner soll ein effizienter Betrieb auch bei Einsatz von gepulsten Lasern möglich sein.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 1 bzw. durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 17 gelöst.

Erfindungsgemäß läßt sich die Bündelung des zur Verfestigung verwendeten Strahls verändern und messen, sodaß je nach dem zu verfestigenden Bereich der Schichten, dem Typ des verwendeten Lasers und des Materials jeweils eine bezüglich der Herstellungsgeschwindigkeit und Genauigkeit optimale Bündelung und Ausrichtung des Strahls eingestellt werden kann. Ferner kann eine eventuelle Verstaubung oder Dejustierung der Optik, ein Defekt der optischen oder elektronischen Komponenten zur Einstellung des Strahls und eine Strahländerung aufgrund von Alterungerscheinungen festgestellt, angezeigt und gegebenenfalls korrigiert werden.

Die Erfindung wird im weiteren anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezug auf die Figuren beschrieben. Von den Figuren zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung der erfindungsgemäßigen Vorrichtung;

Fig. 2 eine Darstellung des Prinzips zur Veränderung der Bündelung des Strahls;

Fig. 3 eine Darstellung der je nach zu verfestigendem Bereich unterschiedlichen Bündelung des Strahls vorzugsweise bei Verwendung eines gepulsten Lasers;

Fig. 4 eine perspektivische, schematische Darstellung einer Positioniervorrichtung für einen erfindungsgemäßigen Sensor;

Fig. 5 eine Darstellung einer ersten Ausführungsform des Sensors; und

Fig. 6 eine Darstellung einer zweiten Ausführungsform des Sensors.

Die Darstellung der erfindungsgemäßigen Vorrichtung in Fig. 1 zeigt eine Schicht 1 eines mittels elektromagnetischer Strahlung verfestigbaren Materials, beispielsweise einer polymerisierbaren Flüssigkeit oder Paste oder eines sinterbaren Pulvermaterials, sowie eine über dieser Schicht 1 angeordnete Vorrichtung 2 zum Verfestigen des Materials der Schicht 1 an dem herzustellenden Objekt entsprechenden Stellen. Die Verfestigungs-

vorrichtung 2 weist eine Strahlungsquelle 3 in Form eines Lasers auf, die einen gebündelten Lichtstrahl 4 auf eine Ablenkeinrichtung 5 richtet, mittels der der Lichtstrahl 4 auf die gewünschten Stellen der Schicht 1 abgelenkt werden kann. Zu diesem Zweck ist die Ablenkeinrichtung mit einer Steuereinheit 6 zur entsprechenden Steuerung der Ablenkeinrichtung 5 verbunden.

Zwischen der Strahlungsquelle 3 und der Ablenkeinrichtung 5 ist im Lichtstrahl 4 nacheinander ein Modulator 7 und eine variable Fokuseinheit 8 angeordnet, die ebenfalls mit der Steuereinheit 6 zur Steuerung in der weiter unten beschriebenen Weise verbunden sind. Der Modulator kann beispielsweise als akusto-optischer, elektro-optischer oder mechanischer Modulator ausgebildet sein und dient als "Schalter" zum Durchschalten bzw. Unterbrechen des Strahls 4.

Die variable Fokuseinheit 8 dient dazu, die Bündelung des Strahls 4 zu verändern. Zu diesem Zweck weist sie in der in Fig. 2 genauer dargestellten Weise in Richtung des Strahls 4 eine Zerstreuungslinse 9 und nachfolgend eine Sammellinse 10 auf. Die Sammellinse ist in Richtung des Strahls 4 beispielsweise zwischen der gestrichelten Position in Fig. 2 und der in durchgezogenen Linien gezeichnete Position positionierbar und bewirkt damit je nach ihrer Position eine Veränderung der Fokus und damit des Durchmessers des Strahls an einer Arbeits- oder Referenzebene 11, die beispielsweise die Oberfläche der Schicht 1 sein kann. Die Verschiebung der Sammellinse 10 erfolgt durch einen (nicht gezeigten) Verschiebevorrichtung unter Verwendung eines Schrittmotors oder Servomotors, die mit der Steuereinheit 6 verbunden ist. Anstelle der Anordnung mit zwei Linsen 9, 10 kann auch jede andere geeignete Mehrlinseanordnung verwendet werden, bei der die Fokusveränderung durch Verschieben von 2 Linsen relativ zueinander erfolgt.

Zwischen der Ablenkeinrichtung 5 und der Schicht 1 ist ferner ein Sensor 12 angeordnet, der mittels der in Fig. 4 näher dargestellten Positioniervorrichtung 13 in einer Ebene parallel zu und vorzugsweise unmittelbar oberhalb der Schicht 1 an jede Stelle oberhalb der Schicht 1 verschoben werden kann. Die Positioniervorrichtung 13 ist als x,y-Positioniervorrichtung ausgebildet, wobei der Sensor 12 in einer ersten X-Richtung entlang der Oberseite eines sich in X-Richtung über die Schicht 1 erstreckenden Abstreifers 14 verschiebbar ist, der wiederum in Y-Richtung über die Schicht 1 zum Einstellen einer gewünschten Schichtdicke des Materials verschoben werden kann. Gemäß einer anderen Ausführungsform kann der Sensor aber auch unabhängig vom Abstreifer positioniert werden. Der Ausgang des Sensors ist mit der Steuereinheit 6 verbunden.

Eine erste Ausführungsform des Sensors 12 ist in Fig. 5 dargestellt. Der Sensor 12 nach Fig. 5 ist als Quadrantensensor mit einer in jedem Quadranten angeordneten Photodiode 15, 16, 17, 18 ausgebildet. Die Photodiode 18 eines Quadranten ist mittels eines strahlungsundurchlässigen Metallplättchens 19 abgedeckt, in deren Mitte sich eine Blendöffnung 20 befindet. Gemäß einer in Fig. 6 gezeigten zweiten Ausführungsform ist der Sensor 12 als Einzelsensor mit nur einem einzigen Feld ausgebildet, wobei in dem Feld eine Photodiode 21 angeordnet ist, die wiederum mit einem strahlungsundurchlässigen Metallplättchen bis auf eine zentrale Blendöffnung 23 abgedeckt ist. Der Durchmesser der Blendöffnungen 20, 23 ist etwa 20 bis 50 µm, vorzugsweise etwa 35 µm.

Im Betrieb wird zunächst der Laserstrahl 4 bezüglich

seiner Position, Leistung und seines Durchmessers gemessen. Die Positionsbestimmung erfolgt dabei beispielsweise mittels des in Fig. 5 gezeigten Sensors 12 dadurch, daß der Sensor 12 an einer bestimmten definierten X.Y-Stelle positioniert wird und die Ablenkeinrichtung 5 von der Steuereinheit 6 so gesteuert wird, daß der abgelenkte Strahl 4 den Sensor 12 überstreicht und dabei vom Feld der Photodiode 15 zu dem der Photodiode 16 wandert. Dabei werden die von beiden Photodioden abgegebenen Ausgangssignale verglichen; bei Gleichheit entspricht die Position des Strahls 4 genau dem Übergang zwischen den beiden Photodiodenfeldern und damit der Mittenposition des Sensors 12. Dieselbe Messung wird auch für den Übergang von der Photodiode 15 zur Photodiode 17 vorgenommen. Durch Vergleich der erhaltenen Positionsdaten mit der entsprechenden Positionsvorgabe für die Ablenkeinrichtung 5 wird festgestellt, ob die Steuerung für den Strahl 4 korrekt ist oder ob eine Dejustierung vorliegt. Im letzteren Fall wird eine Korrektur der Steuerung in der Steuereinheit 6 oder auch eine Neujustage der Vorrichtung vorgenommen. Die Positionsmessung wird durch Verfahren des Sensors 12 an über die Schichtoberfläche 1 verteilte Positionen mittels der Positionierzvorrichtung 13 an beliebigen Stellen innerhalb des Belichtungsfeldes vorgenommen, sodaß die Positionergenauigkeit der Verfestigungsvorrichtung 2 exakt bestimmbar ist. Ebenso ist es allerdings auch möglich, nur an ausgewählten Punkten, beispielsweise an 2 Punkten, zu messen, um eine globale Drift beispielsweise aufgrund von Temperaturänderungen festzustellen. Diese kann wiederum durch entsprechende Korrektur der Steuereinheit 6 bzw. der darin gespeicherten Steuersoftware kompensiert werden.

Die Leistung des Strahls 4 kann durch direkte Auswertung der Ausgangssignale der Photodioden 15, 16 und 17, deren Amplitude der Leistung entspricht, vorgenommen werden. Durch Vergleich mit Sollwerten kann wiederum ein Fehler in der Verfestigungsvorrichtung 2 festgestellt werden, beispielsweise eine Verstaubung der Optik, eine Alterung oder auch ein Ausfall von optischen oder elektronischen Komponenten.

Für die Messung des Durchmessers bzw. des Fokus des Strahls 4 wird die Ablenkeinrichtung 5 und/oder die Positionierzvorrichtung 13 so gesteuert, daß der abgelenkte Strahl 4 die Blendenöffnung 20 des Sensors nach Fig. 5 oder die Blendenöffnung 23 des Sensors nach Fig. 6 in zwei Koordinatenrichtungen überstreicht. Dadurch wird das Intensitätsprofil des Strahls 4 abgetastet und aus den gewonnenen Intensitätsdaten des Profils der Fokus bzw. Durchmesser der Strahls 4 berechnet. Diese Messung kann im gesamten Belichtungsfeld oder auch nur an ausgewählten Punkten, beispielsweise in Verbindung mit der Leistungsmessung, durchgeführt werden. Durch Vergleich mit entsprechenden Sollwerten kann wiederum eine Abweichung beispielsweise aufgrund der Alterung des Lasers oder einer Dejustage des optischen Systems festgestellt werden. In diesem Fall kann in gewissem Rahmen eine Korrektur durch Veränderung des Fokus mittels Ansteuerung der variablen Fokuseinheit 8 vorgenommen werden.

Bei Verwendung des in Fig. 6 gezeigten Sensors 12 wird die Position und Leistung des Strahls 4 aufgrund von Berechnungen ermittelt, und zwar die Position durch Bestimmung des Intensitätsmaximums und die Leistung durch Integration des Profils. Derartige Rechenverfahren sind bekannt, sodaß sie hier nicht näher erläutert werden müssen.

Nach der Einstellung und Messung des Strahls 4 wird eine Materialschicht 1 aufgetragen und durch gezieltes Bestrahlen der Schicht 1 mittels des abgelenkten Strahls 4 an den dem Objekt entsprechenden Punkten verfestigt. In Fig. 3 ist ein Bereich 24 dargestellt, der beispielhaft die zu verfestigenden Stellen des Objekts dieser Schicht umfassen soll. Dieser Bereich wird für die Verfestigung in einen äußeren Hüllbereich 25 und einen inneren Kernbereich 26 aufgeteilt, wobei der Hüllbereich 25 den Kernbereich 26 vorzugsweise vollständig umschließt. Zur Verfestigung steuert die Steuereinheit 6 die variable Fokuseinheit 8 und die Ablenkeinrichtung 5 derart, daß die Schicht 1 in der in Fig. 3 durch die kleinen Kreise angedeuteten Weise im Hüllbereich 25 mit einem kleinen Strahldurchmesser bzw. Fokus und im Kernbereich 26, angedeutet durch die größeren Kreise, mit einem größeren Strahldurchmesser bzw. Fokus bestrahlt wird. Damit wird im Hüllbereich eine feinere und genauere Verfestigung des Materials im Hüllbereich 25, der die Oberfläche bzw. Kontur des Objekts bildet, erreicht. Wird gleichzeitig gemäß einer bevorzugten Weiterbildung die Ablenkeinrichtung 5 so gesteuert, daß die Geschwindigkeit, mit der der abgelenkte Strahl 4 über die Schicht 1 streicht (d. h. die Scan-Geschwindigkeit), im Kernbereich 26 höher als im Hüllbereich 25 ist, dann läßt sich auch die Herstellungszeit wesentlich verkürzen. Diese Maßnahme ist insbesondere bei hohen Leistungen des Lasers 3 sinnvoll, da dann auch bei großem Strahldurchmesser oder Fokus eine ausreichende Leistungsdichte vorhanden ist, um eine Verfestigung auch bei höherer Scangeschwindigkeit zu erreichen. Bei Einsatz einer Strahlungsgquelle mit einstellbarer Leistung kann in diesem Fall die Leistung bei der Verfestigung des Hüllbereichs 25 verringert werden, um die Energie- bzw. Leistungsdichte auf einen für die Verfestigung geeigneten Wert einzustellen.

Eine besonders bevorzugte Anwendung findet das oben beschriebene Verfahren bei Verwendung eines gepulsten Lasers als Strahlungsquelle 3. Die Pulsrate derartiger Laser ist in der Regel zu niedrig, um bei kleinem Fokus hohe Scangeschwindigkeiten zu erzielen. Vielmehr werden dann nur noch einzelne voneinander abstandete Stellen verfestigt. Andererseits nimmt die mittlere Leistung dieser Laser ab einer bestimmten Pulsrate ab. Weiterhin ist die Pulsdauer von beispielsweise frequenzvervielfachten FK-Lasern sehr kurz (ca. 30ns). Die Einstellung der in das Material eingebrachten Energie- bzw. Leistungsdichte ist nicht mehr über die Scangeschwindigkeit, sondern nur noch durch Abschwächung, die Repetitionsrate des Lasers und/oder die Einstellung des Strahldurchmessers möglich. Für einen Betrieb mit größtmöglicher Effizienz hat sich erfindungsgemäß die Einstellung des Strahldurchmessers herausgestellt. Für einen vorgegebenen Wert des Strahldurchmessers ergibt sich dann eine optimale Repetitionsrate in Verbindung mit einer optimalen Scangeschwindigkeit.

Erfundungsgemäß wird damit zur Erzielung einer kurzen Herstellungszeit bei gepulsten Lasern im Hüllbereich 25 mit kleinerem Fokus und im Kernbereich 26 mit größerem Fokus verfestigt und die Scangeschwindigkeit jeweils so eingestellt, daß in beiden Bereichen die bei jedem Puls verfestigten Bereiche 27 überlappen und damit eine durchgehende Linie verfestigt wird. Dieser Sachverhalt ist in Fig. 3 dargestellt: da die damit zulässige Scangeschwindigkeit proportional zum Durchmesser des in Fig. 3 kreisförmig dargestellten Strahls oder Fokus 27 ist, kann die Scangeschwindigkeit im Kernbe-

reich 26 gegenüber derjenigen des Hüllbereichs 25 um denselben Faktor erhöht werden, um den der Durchmesser im Kernbereich vergrößert ist. Außerdem sind im Kernbereich 26 auch entsprechend weniger Überstreichungen erforderlich. Damit reduziert sich die Herstellungszeit mit dem Quadrat der relativen Durchmessergrößerung. In beiden Bereichen 25, 26 ergibt sich aus der entsprechenden Scangeschwindigkeit die Repetitionsrate und damit mittlere Leistung des Lasers, so daß im Ergebnis im Hüllbereich 25 mit kleinerer mittlerer Leistung und im Kernbereich 26 mit größerer mittlerer Leistung gefahren wird.

Zur Einstellung des Fokus wird von der Steuereinheit 6 je nachdem, ob die Ablenkeinrichtung 5 den Strahl 4 gerade auf den Kernbereich 26 oder den Hüllbereich 25 ablenkt, die Position der Sammellinse 10 relativ zur Zerstreuungslinse durch Axialverschiebung verändert. Die entsprechenden Steuerdaten sind in der Steuereinheit 6 gespeichert. Vorzugsweise wird zunächst mit einer kleinen Fokuseinstellung der Hüllbereich 25 verfestigt, dann der Fokus vergrößert und mit der einmal eingestellten Vergrößerung der Kernbereich 26 verfestigt. Eine Messung und Korrektur der Fokuseinstellung des Strahls ist wiederum mittels des Sensors 12 in der oben dargelegten Weise möglich.

Die weiteren Schichten des Objekts werden in der gleichen Weise aufgetragen und verfestigt.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Herstellung eines dreidimensionalen Objekts durch aufeinanderfolgendes Verfestigen von Schichten eines durch Einwirkung elektromagnetischer Strahlung verfestigbaren Materials, mit einer Vorrichtung zum Erzeugen einer Schicht (1) des Materials, einer Strahlungsquelle (3) zur Erzeugung eines gebündelten Strahls (4) der elektromagnetischen Strahlung und einer Ablenkvorrichtung (5) zum Ablenken des gerichteten Strahls (4) auf dem Objekt entsprechende Stellen der Schicht (1), dadurch gekennzeichnet, daß im Strahl (4) eine variable Fokuseinheit (8) zur Veränderung der Bündelung des Strahls (4) angeordnet ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die variable Fokuseinheit (8) zwischen der Strahlungsquelle (1) und der Ablenkvorrichtung (5) angeordnet ist.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die variable Fokuseinheit (8) im Strahl zwei in Axialrichtung relativ zueinander verschiebbare Linsen (9, 10) aufweist.
4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß im Strahl (4) ein Modulator (7) zum gesteuerten Unterbrechen bzw. Durchlassen des Strahls angeordnet ist.
5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die variable Fokuseinheit (8) und die Ablenkvorrichtung (5) und gegebenenfalls der Modulator (7) mit einer Steuereinheit (6) zur Veränderung des Fokus des Strahls (4) in Abhängigkeit von der Ablenkung verbunden sind.
6. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlungsquelle (3) einen Laser aufweist.
7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Laser als gepulster Laser ausge-

bildet ist.

8. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen der Ablenkteinrichtung (5) und der Schicht (1) ein Sensor (12) zur Messung des Strahls (4) angeordnet ist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor (12) mit einer Positioniervorrichtung (13) zum Positionieren des Sensors an einer Mehrzahl von Stellen in einer Ebene parallel zur Schicht (1) verbunden ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Positioniervorrichtung (13) als x,y-Positioniervorrichtung ausgebildet ist.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß eine sich in einer ersten Richtung (X) quer über die Schicht (1) erstreckende und in einer zweiten Richtung (Y) über die Schicht (1) verfahrbare Abstreifvorrichtung vorgesehen ist und daß der Sensor (12) an der Abstreifvorrichtung in der ersten Richtung (X) verschiebbar angeordnet ist.

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor (12) zur Messung der Position, der Leistung und/oder des Durchmessers des Strahls (4) ausgebildet ist.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor (12) als Quadrantendetektor mit mindestens drei Detektorsektoren (15, 16, 17) ausgebildet ist.

14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor (12) einen Einzeldetektor mit einer bis auf eine Blendenöffnung (23) Strahlungsdurchlässig abgedeckten, strahlungsempfindlichen Detektorfläche (21) aufweist.

15. Vorrichtung nach Anspruch 13 und 14, dadurch gekennzeichnet, daß der Einzeldetektor im vierten Quadranten angeordnet ist.

16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor (12) und/oder die Positioniervorrichtung (13) mit der Steuereinheit verbunden sind.

17. Verfahren zum Herstellen eines dreidimensionalen Objekts, bei dem aufeinanderfolgende Schichten eines durch elektromagnetische Strahlung verfestigbaren Materials aufgetragen und durch Bestrahlung mittels eines gebündelten Strahls an den dem Objekt entsprechenden Stellen der Schichten verfestigt werden, dadurch gekennzeichnet, daß die Bündelung des Strahls bei der Verfestigung verändert wird.

18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Bündelung in Abhängigkeit von der zu verfestigenden Stelle der Schicht verändert wird.

19. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß in einem Randbereich des Objekts entsprechenden ersten Bereich die Bündelung zur Bildung eines kleineren Fokus verstärkt wird und in einem Innenbereich des Objekts entsprechenden zweiten Bereich die Bündelung zur Bildung eines größeren Fokus verringert wird.

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Bündelung in Abhängigkeit von der Leistung der Strahlungsquelle für den gebündelten Strahl verändert wird.

21. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 20,

dadurch gekennzeichnet, daß die Bündelung in Abhängigkeit von einer Geschwindigkeit, mit der der gebündelte Strahl über die Schicht bewegt wird, verändert wird.

22. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß eine gepulste Strahlungsquelle verwendet wird und die Bündelung in Abhängigkeit von der Pulsergie eingestellt wird.

23. Verfahren nach den Ansprüchen 19 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß die Verfestigung im ersten Bereich mit einer starken Bündelung und einer niedrigen Geschwindigkeit und im zweiten Bereich mit einer schwächeren Bündelung und einer höheren Geschwindigkeit durchgeführt wird.

24. Verfahren nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, daß im zweiten Bereich die Strahlleistung bzw. bei Verwendung eines gepulsten Lasers die mittlere Strahlleistung erhöht ist.

25. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Position, die Leistung und/oder der Fokussdurchmesser des Strahls an einer Stelle vorzugsweise unmittelbar oberhalb der zu verfestigenden Schicht gemessen wird.

26. Verfahren nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, daß die Bündelung in Abhängigkeit vom Meßergebnis verändert wird.

27. Verfahren nach Anspruch 25 oder 26, dadurch gekennzeichnet, daß das Meßergebnis mit vorgegebenen Referenzwerten verglichen wird und aufgrund des Vergleichs eine Korrektur des Strahls vorgenommen wird.

28. Verfahren nach einem der Ansprüche 25 bis 27, dadurch gekennzeichnet, daß die Messung an einer Mehrzahl von Stellen vorgenommen wird.

35

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

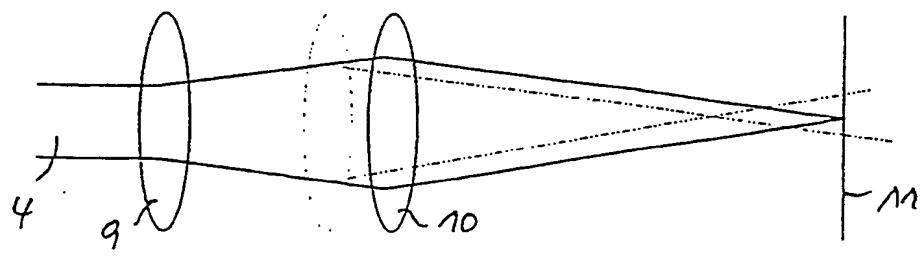
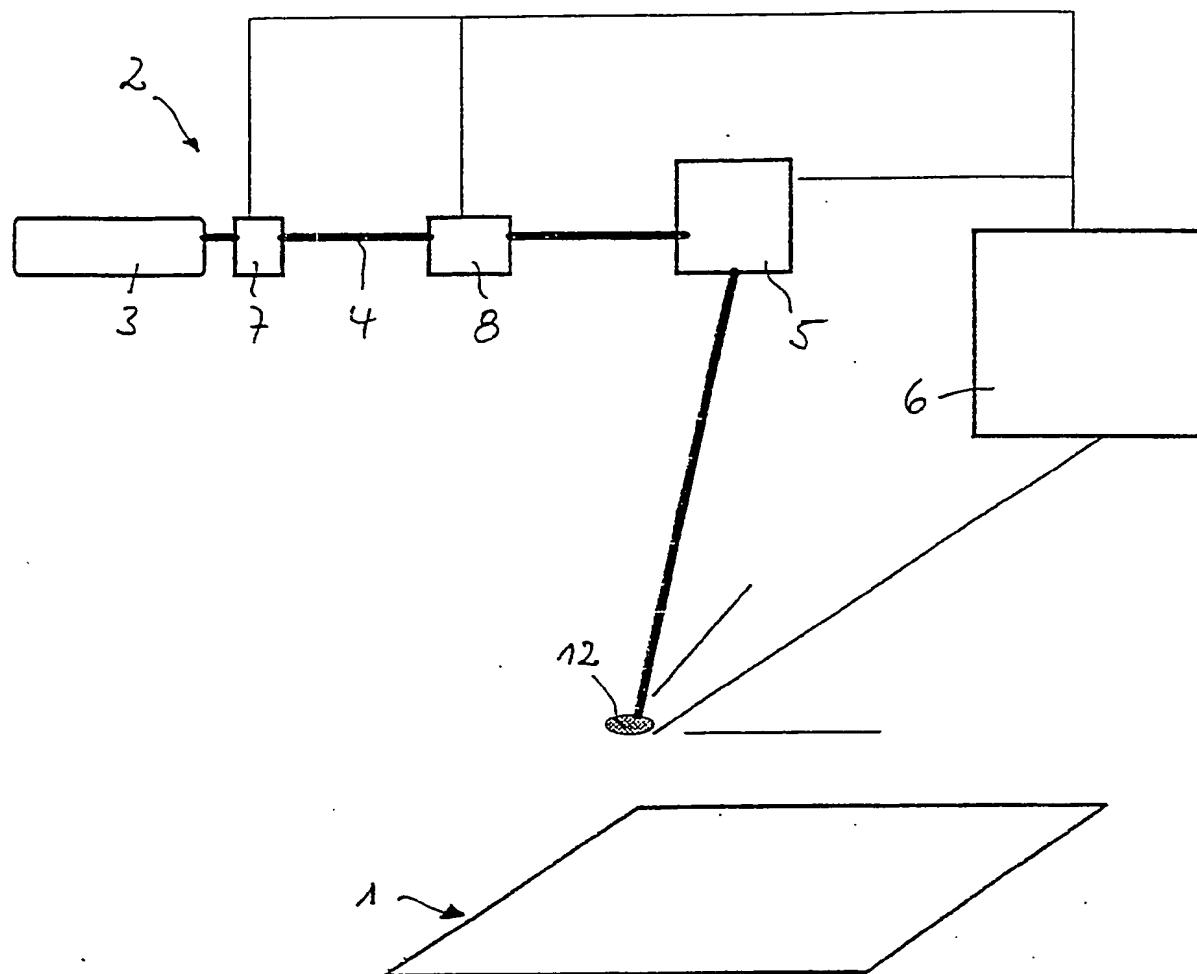


Fig. 2

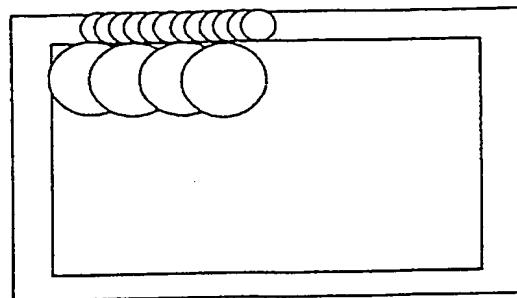


Fig. 3

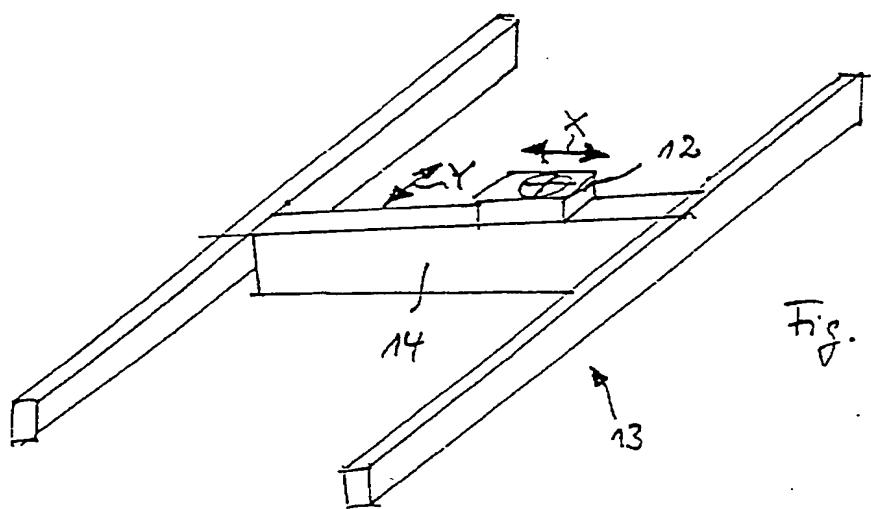


Fig. 4

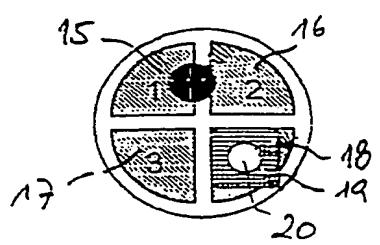


Fig. 5

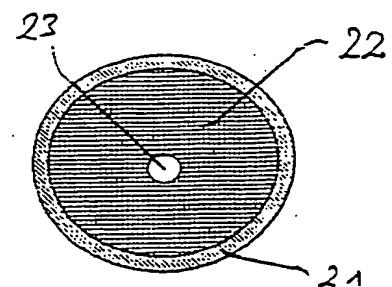


Fig. 6